

# 航海学

上册

钱淡如 主编

杨守仁 主审

人民交通出版社

# 航海学

HANGHAIXUE

上册

钱淡如 主编

杨守仁 主审

人民交通出版社

(京)新登字091号

### 内 容 提 要

本书共分上、中、下三册出版,上册的主要内容为基础航海学。本册共分为两篇,第一篇为基础知识,共分为两章,主要介绍坐标、方向和距离、海图等,包括航向和方位,航速与航程,地图投影,墨卡托投影海图,海图的分类和使用注意事项等;第二篇为航迹推算和陆标定位,共分为三章,主要介绍航迹推算,位置线与船位理论和陆标定位。此外,本册还包括两个附录,分别为海图作业试行规则和海图图式。

本书可作为有关海船驾驶和管理人员的技术参考书。

本书由上海海运学院钱淡如主编,大连海运学院杨守仁主审。

### 航海学【上】

钱淡如 主编

杨守仁 主审

插图设计:秦淑珍 正文设计:乔文平 责任校对:刘素燕

人民交通出版社出版发行

(100013 北京和平里东街10号)

各地新华书店经销

北京四季青印刷厂印刷

开本:787×1092 1/16 印张:8.5 字数:187千

1993年5月 第1版

1993年5月 第1版 第1次印刷

印数:0001—10000册 定价:5.50元

ISBN 7-114-01644-1

U·01092

# 绪 言

航海学 (navigation) 是一门研究船舶如何安全经济地从一个港口航行到另一个港口的实用性科学。因此, 它研究的主要课题是:

一、拟定一条既安全又经济的航线和制定一个切实可行的航行计划。

二、进行航迹推算, 利用航行仪器、考虑风流影响和船舶操纵要素, 引导船舶航行在预定的计划航线上, 并且随时可以得到有一定精度的推算船位。

三、测定船位, 以检查船舶是否航行在既定的计划航线上, 其方法有三大类:

陆标定位——利用目视物标测定船位;

天文定位——利用日月星辰测定船位;

无线电仪器定位——利用船上装备的无线电定位系统的接收机来测定船位。

四、航行方法。研究在各种不同的航海条件下, 应该采取的航行方法, 如狭水道航行、雾中航行等。

为了研究上述课题, 航海学还必须包括: 航海学基础知识、航海图书资料、助航标志以及潮汐潮流推算等基本内容。

其中天文定位, 由于它需要较多的普通天文学知识, 加上近代发展的人造地球卫星定位方法等, 因此, 它早已成为“航海天文学”一门独立的学科, 人们习惯上将它叫作“天文航海”。因而将航海学中除去“天文航海”的内容, 统称之为“地文航海”。也有的人又把航海学中关于无线电航海仪器定位也独立出来, 叫作“电子航海”(electronic navigation)。

本书系高等海运院校海洋船舶驾驶专业本科统编教科书。全书分上、中、下三册出版。上册为基础航海学; 中册为电子航海学; 下册为航路学与航行方法。书中内容力求采用最新资料, 并结合航海实际来阐述航海学的基本理论。但缺点和错误难免, 希望广大读者予以批评指正。

编 者  
一九九〇年

# 目 录

## 绪 言

|                        |     |
|------------------------|-----|
| 第一篇 基础知识.....          | 1   |
| 第一章 坐标、方向和距离.....      | 1   |
| 第一节 地球形状与地理坐标.....     | 1   |
| 第二节 能见地平距离和物标能见距离..... | 5   |
| 第三节 航向与方位.....         | 10  |
| 第四节 船速与航程.....         | 23  |
| 第二章 海图.....            | 29  |
| 第一节 地图投影及其分类.....      | 29  |
| 第二节 恒向线.....           | 32  |
| 第三节 墨卡托投影海图.....       | 34  |
| 第四节 航用海图的其它投影方法.....   | 39  |
| 第五节 识图.....            | 40  |
| 第六节 海图的分类和使用注意事项.....  | 46  |
| 第二篇 航迹推算和陆标定位.....     | 48  |
| 第一章 航迹推算.....          | 48  |
| 第一节 航迹绘算.....          | 49  |
| 第二节 航迹计算.....          | 70  |
| 第二章 位置线和船位理论.....      | 78  |
| 第一节 位置线与船位线.....       | 78  |
| 第二节 位置线梯度及其误差.....     | 80  |
| 第三节 观测船位精度.....        | 84  |
| 第三章 陆标定位.....          | 90  |
| 第一节 方位定位.....          | 90  |
| 第二节 距离定位.....          | 98  |
| 第三节 水平角定位.....         | 101 |
| 第四节 移线定位.....          | 103 |
| 第五节 综合定位.....          | 109 |
| 第六节 单一位置线的应用.....      | 112 |
| 附录一、海图作业试行规则.....      | 113 |
| 附录二、海图图式.....          | 116 |

# 第一篇 基础知识

## 第一章 坐标、方向和距离

### 第一节 地球形状与地理坐标

#### 一、地球形状

为了在地面上研究船舶的位置、方向和距离等航海基础问题，有必要对地球的形状和大小作一定的了解。但地球自然表面的形状是非常复杂的，有高山和深谷，表面崎岖不平。可是从整个地球外表来看，由于地球体积较大，这些局部的起伏与地球半径相对比较，就显得非常之小。例如我国的珠穆朗玛峰虽高达8 848m，但与地球半径6 370km相比，仅为地球半径的千分之一左右。所以对地球形状来说，这些局部起伏的影响是微不足道的。

所谓地球形状，并不是指地球自然表面的形状，而是指由假想的大地水准面所包围的大地球体（geoid）的形状。所谓大地水准面，是一个最基本的水准面，它是一个假想的、与完全均衡状态的海洋面相吻合的水准面。如果将它向大陆延伸，并且使这一延伸面始终保持在任何地方都与该地的铅垂线相交成直角，则这一连续的、无叠痕的、无棱角的闭合水准面，叫作大地水准面。被大地水准面所围成的球体，是理想的地球形状，叫作大地球体。

但大地球体是一个不规则的几何体。一般在应用上，是以地球圆球体作为它的第一近似体；而以地球椭圆体作为它的第二近似体。

航海上为了计算上的简便，通常是将大地球体当作地球圆球体。并且根据航海上常用的长度单位，一海里（n mile）等于1852m的规定，而推算出地球圆球体的半径  $R$ ：

$$R = \frac{360^\circ \times 60'}{2\pi} \text{ n mile} = 3\,437.7468 \text{ n mile} = 6\,366\,707 \text{ m}$$

但在大地测量学、地图学和需要较为准确的航海计算中，应该将大地球体当作两极略扁的地球椭圆体，才能够得出有足够精度的结果。

地球椭圆体（spheroid）即旋转椭圆体（图1-1-1）。它是由椭圆  $P_N Q P_S Q'$  绕其短轴  $P_N P_S$  旋转而成的几何体。椭圆短轴  $P_N P_S$  即地球的自转轴——地轴（earth's axis）；短轴的两个端点  $P_N$  和  $P_S$  是地极（poles）；长轴绕短轴旋转的平面是赤道平面；长轴端点  $Q$  旋转而成的圆周是赤道  $QQ'$ （equator）；过短轴  $P_N P_S$  的任一平面是子午圈平面，它与地球椭圆体表面相交的截痕是一椭圆，称为子午圈（meridian），其中由北极到南极的半个椭圆，叫作地理子午线、子午线或经线（meridian line）。与赤道平面相平行的、与地轴垂直相交的平面，称为纬度圈平面，它与地球椭圆体表面相交的截痕是一个圆，称为纬度圈（parallel of latitude）。

表示地球椭圆体的参数有：长半轴  $a$ 、短半轴  $b$ 、扁率  $c$  和偏心率  $e$ 。它们相互之间的

关系是,

$$c = \frac{a-b}{a}; \quad e = \frac{\sqrt{a^2-b^2}}{a}$$

$$\therefore e^2 = \left(1 - \frac{b}{a}\right) \left(1 + \frac{b}{a}\right) = c(2-c) \approx 2c$$

地球椭圆柱参数必须根据大地测量中的弧度测量的结果计算出来。由于各个国家在测量时,采用的纬度和测量精度有所不同,因此所得的地球椭圆柱的参数也略有差异。我国现在采用的是苏联克拉索夫斯基的地球椭圆柱参数,其值是:

$$a = 6\,378\,245\text{m}; \quad b = 6\,356\,863\text{m}$$

$$c = \frac{1}{298.3}; \quad e = 0.081813369$$

而1924年国际测量学协会决定,国际上采用1910年海福特测量的地球椭圆柱参数,其值是:

$$a = 6\,378\,388\text{m}; \quad b = 6\,356\,912\text{m}$$

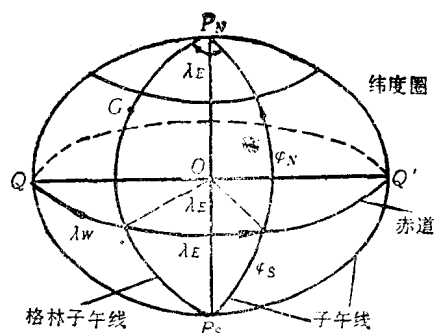


图 1-1-1

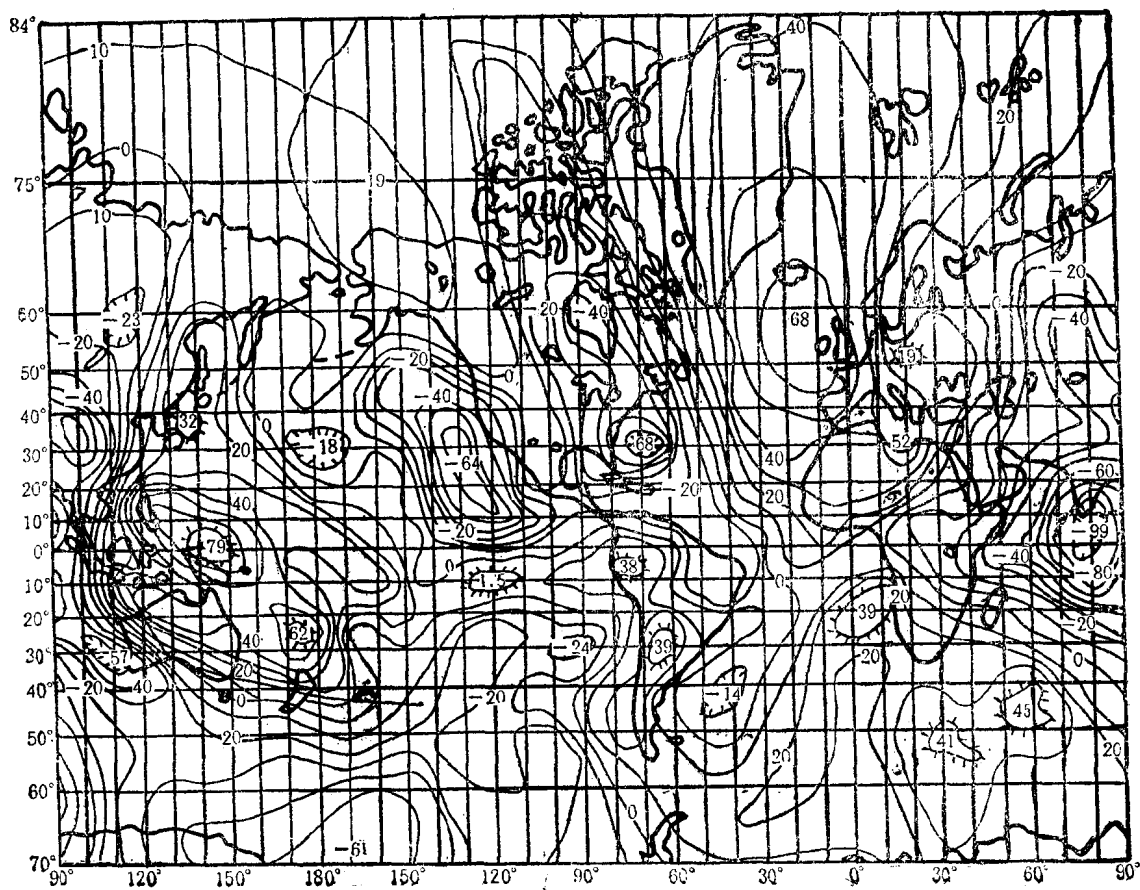


图 1-1-2

$$c = \frac{1}{297}, \quad e = 0.081991787$$

从准确的水准测量知道，大地水准面与地球椭球体表面之间的高度差，最大不超过 100 m。根据美国约翰·霍普金斯大学发布的地图（图1-1-2），其高度差为 +79m 到 -99m。该高度差值在人造地球卫星定位中，计算接收机天线高度时，是一个不可忽视的因素。

其实大地球体的赤道和等纬圈也不是一个圆，它们也都近似于椭圆，不过其扁率就更小，约为  $\frac{1}{32\,000}$ 。若将地球赤道和纬度圈也认为是一个椭圆时，那是大地球体的第三近似体，叫作三轴椭球体或地球椭球体。但在一般的实际应用中，都不必这样来考虑它。

## 二、地理坐标

地球椭球体表面任意一点的位置，可以用地理坐标，即地理经度和地理纬度来确定。航海上船舶的位置和物标的位置都是用地理坐标来表示的。

地理坐标的基准圈是赤道和格林子午线，即通过英国伦敦格林威治（Greenwich）天文台子午仪的子午线，作为计算地理经度的起始子午线或称零度经线（prime meridian）。起始子午线与赤道的交点是地理坐标的起算点。

地面上某点的地理经度（geographical longitude）是按下述方法来确定：它是以格林经线为基准，以格林子午线与该点子午线之间所截的赤道短弧，或此短弧所对的球心角和极角，作为该点的地理经度，航海上用  $\lambda$  或 long 来表示地理经度。某点经度的计算方法是，从格林子午线起算，向东或向西，由  $0^\circ$  到  $180^\circ$  计量，算至该点子午线。向东计算的叫东经，用 E 标示；向西计算的叫作西经，用 W 标示。例如北京的经度是  $116^\circ 28' 2E$ ，而纽约的经度是  $73^\circ 50' W$ 。

地面上某点的地理纬度（geographical latitude）是用下述方法来确定：它是以赤道为基准，以椭圆子午线在该点的法线与赤道面的交角，作为该点的地理纬度，航海上常用  $\varphi$  或 lat 来表示地理纬度。某点的地理纬度的计算方法是：从赤道起算，向北或向南，由  $0^\circ$  到  $90^\circ$  计量。在赤道以北的叫作北纬，用 N 标示；在赤道以南的叫作南纬，用 S 标示。例如北京的纬度是  $39^\circ 54' 4N$ ，而好望角的纬度是  $34^\circ 21' S$ 。

除上述地理坐标外，表示地面上点的坐标的方法，在航海上还可能会遇到有以下两种：

1. 天文坐标：它是通过天文观测求得的。而天文观测的基准是测者的铅垂线，即通过测者并与测者地平平面相垂直的线。因此，天文经度（astronomical longitude）是通过测者铅垂线，并且与地轴平行的平面，即测者天文子午面与格林子午面之间小于  $180^\circ$  的两面角。而天文纬度（astronomical latitude）则是测者铅垂线与赤道面的交角。天文纬度与地理纬度之差叫作垂线偏差，它是该点椭圆子午线法线与该点的铅垂线之间的夹角。它主要是由于地表上层 120km 之内地质不均匀而引起的，其最大值可达  $20''$ 。

2. 地心坐标：它是由该点的地理经度和该点的地心纬度（geocentric latitude）组成的。某点的地心纬度  $\varphi$ 。（图1-1-3）是该点地球椭圆体的向径与赤道面的交角。地理纬度  $\varphi$  与地心纬度  $\varphi$  之间的关系如下：

若地球椭圆子午圈方程式为：

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$$

则：

$$\frac{dy}{dx} = -\frac{b^2}{a^2} \cdot \frac{x}{y}$$

而该点的斜率为:  $\frac{dy}{dx} = \operatorname{tg}(90^\circ + \varphi) = -\operatorname{ctg}\varphi$

$$\therefore \operatorname{tg}\varphi = \frac{a^2}{b^2} \cdot \frac{y}{x}$$

但

$$\operatorname{tg}\varphi_e = \frac{y}{x}$$

$$\therefore \operatorname{tg}\varphi = \frac{a^2}{b^2} \operatorname{tg}\varphi_e = \frac{1}{(1-e^2)} \operatorname{tg}\varphi_e$$

$$\operatorname{tg}\varphi - \operatorname{tg}\varphi_e = e^2 \operatorname{tg}\varphi$$

$$\sin(\varphi - \varphi_e) = e^2 \sin\varphi \cos\varphi_e \approx e^2 \sin 2\varphi$$

$$\therefore (\varphi - \varphi_e)'' = \frac{e^2 \sin 2\varphi}{\operatorname{arc} 1''} = 691.5 \sin 2\varphi$$

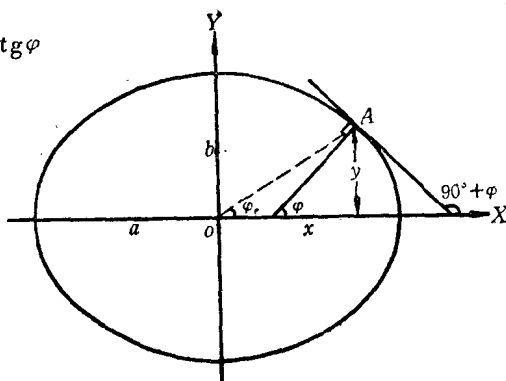


图 1-1-3

即地理纬度与地心纬度之差，地心纬度改正量在赤道和两极均为零；而在  $\varphi = 45^\circ$  时，此差值可达11.5。地心纬度改正量  $(\varphi - \varphi_e)$  如表1-1-1所列。

地心纬度改正量表

表1-1-1

| $\varphi$ | $\varphi - \varphi'$ | $\varphi$ | $\varphi$ | $\varphi - \varphi'$ | $\varphi$ | $\varphi$ | $\varphi - \varphi'$ | $\varphi$ |
|-----------|----------------------|-----------|-----------|----------------------|-----------|-----------|----------------------|-----------|
| 1°        | 0'24".1              | 89°       | 16°       | 6'06".4              | 74°       | 31°       | 10'10".6             | 59°       |
| 2         | 0'48".2              | 88        | 17        | 6'26".7              | 73        | 32        | 10'21".5             | 58        |
| 3         | 1'12".2              | 87        | 18        | 6'46".5              | 72        | 33        | 10'31".7             | 57        |
| 4         | 1'36".3              | 86        | 19        | 7'05".7              | 71        | 34        | 10'41".1             | 56        |
| 5         | 2'00".1              | 85        | 20        | 7'24".5              | 70        | 35        | 10'49".8             | 55        |
| 6         | 2'23".8              | 84        | 21        | 7'42".7              | 69        | 36        | 10'57".7             | 54        |
| 7         | 2'47".3              | 83        | 22        | 8'00".4              | 68        | 37        | 11'04".7             | 53        |
| 8         | 3'10".6              | 82        | 23        | 8'17".4              | 67        | 38        | 11'11".0             | 52        |
| 9         | 3'33".7              | 81        | 24        | 8'33".9              | 66        | 39        | 11'16".4             | 51        |
| 10        | 3'56".5              | 80        | 25        | 8'49".7              | 65        | 40        | 11'21".0             | 50        |
| 11        | 4'19".0              | 79        | 26        | 9'04".9              | 64        | 41        | 11'24".8             | 49        |
| 12        | 4'41".2              | 78        | 27        | 9'19".4              | 63        | 42        | 11'27".7             | 48        |
| 13        | 5'03".1              | 77        | 28        | 9'33".3              | 62        | 43        | 11'29".8             | 47        |
| 14        | 5'24".5              | 76        | 29        | 9'46".4              | 61        | 44        | 11'31".1             | 46        |
| 15        | 5'45".8              | 75        | 30        | 9'58".9              | 60        | 45        | 11'31".5             | 45        |

两地经度之代数差叫作经差 (difference of longitude)，用符号  $D\lambda$  表示；两地纬度之代数差叫作纬差 (difference of latitude)，用符号  $D\varphi$  表示。经差和纬差都应有方向性，其确定的原则是：如果是由起航点至到达点，则应视到达点在起航点之东或西，来确定经差的方向是东或是西；同样应视到达点在起航点位置之南或之北，来确定纬差的方向是南或是北。其计算公式如下：

$$D\lambda = \lambda_2 - \lambda_1$$

$$D\varphi = \varphi_2 - \varphi_1$$

式中： $\lambda_1, \lambda_2$ ——起航点经度和到达点经度；

$\varphi_1, \varphi_2$ ——起航点纬度和到达点纬度。

计算时可以将东经作为正值(+)，西经作为负值(-)；北纬作为正值(+)、南纬作为负值(-)。按求代数差的方法进行运算。

例1：某船由  $32^\circ 26' \text{N}, 122^\circ 06' \text{W}$  航行至  $45^\circ 14' \text{N}, 96^\circ 04' \text{W}$ ，求两地的经差和纬差。

$$\begin{array}{rcl}
 \text{解: } & \varphi_2 \ 45^\circ 14' \text{N}(+) & \lambda_2 \ 96^\circ 04' \text{W}(-) \\
 & -) \varphi_1 \ 32^\circ 26' \text{N}(+) & -) \lambda_1 \ 122^\circ 06' \text{W}(-) \\
 \hline
 & D\varphi \ 12^\circ 48' \text{N}(+) & D\lambda \ 26^\circ 02' \text{E}(+)
 \end{array}$$

例2：某船由 $24^\circ 38' \text{S}$ 、 $150^\circ 42' \text{E}$ 航行至 $12^\circ 44' \text{N}$ 、 $176^\circ 12' \text{W}$ ，求两地的经差和纬差。

$$\begin{array}{rcl}
 \text{解: } & \varphi_2 \ 12^\circ 44' \text{N}(+) & \lambda_2 \ 176^\circ 12' \text{W}(-) \\
 & -) \varphi_1 \ 24^\circ 38' \text{S}(-) & -) \lambda_1 \ 150^\circ 42' \text{E}(+) \\
 \hline
 & D\varphi \ 37^\circ 22' \text{N}(+) & D\lambda \ 326^\circ 54' \text{W}(-) \\
 & & \text{即 } 33^\circ 06' \text{E}
 \end{array}$$

经差不能大于 $180^\circ$ 。当计算结果经差大于 $180^\circ$ 时，则应该用 $360^\circ$ 相减，其结果方向相反。如果计算经差和纬差的两点，并不是航行中的起航点和到达点，则应该以计算的基准点作为起航点，而另一点作为到达点来进行计算。

## 第二节 能见地平距离和物标能见距离

### 一、航海上的距离单位

航海上度量距离的长度单位是海里 (n mile)，它等于地球椭圆子午线上纬度一分所对应的弧长。其长度可由下面的推导得出：

从图1-1-3中知道，椭圆子午线上任意一点的直角坐标值，可以按下面的方法求得：

$$\begin{aligned}
 \therefore \quad \operatorname{tg} \varphi &= \frac{a^2}{b^2} \cdot \frac{y}{x} \\
 \therefore \quad y &= \frac{b^2}{a^2} x \operatorname{tg} \varphi
 \end{aligned}$$

以此代入标准椭圆方程式，则可以得到：

$$\begin{aligned}
 \frac{x^2}{a^2} + \frac{1}{b^2} \left( \frac{b^2}{a^2} x \operatorname{tg} \varphi \right)^2 &= 1 \\
 \therefore \quad x^2 [1 + (1 - e^2) \operatorname{tg}^2 \varphi] &= a^2 \\
 x^2 [\sec^2 \varphi - e^2 \operatorname{tg}^2 \varphi] &= a^2 \\
 x^2 &= \frac{a^2 \cos^2 \varphi}{1 - e^2 \sin^2 \varphi}
 \end{aligned}$$

$$\therefore \quad x = r = \frac{a \cos \varphi}{\sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}}$$

式中： $r$ ——纬度圈半径。

$$\text{若令: } w = \sqrt{1 - e^2 \sin^2 \varphi}$$

$$\text{则: } x = \frac{a \cos \varphi}{w}$$

$$\begin{aligned}
 y &= (1 - e^2) \frac{a \cos \varphi}{w} \operatorname{tg} \varphi \\
 &= \frac{a(1 - e^2) \sin \varphi}{w}
 \end{aligned}$$

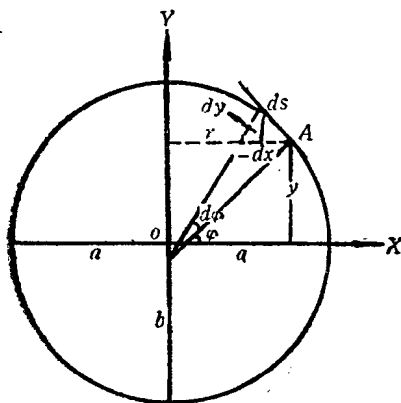


图 1-1-4

为了求地球椭圆子午弧的弧长，则从图1-1-4中可以得到：

$$\Delta S = M d\varphi = \frac{-dx}{\sin \varphi}$$

式中： $M$ ——椭圆子午弧的曲率半径。

因此：
$$M = -\frac{1}{\sin\varphi} \frac{dx}{d\varphi}$$

但：

$$\begin{aligned} \frac{dx}{d\varphi} &= \left( -aw\sin\varphi + \frac{1}{w} \cdot ae^2\sin\varphi\cos^2\varphi \right) \cdot \frac{1}{w^2} \\ &= -\frac{a\sin\varphi}{w^3} (w^2 - e^2\cos^2\varphi) \\ &= -\frac{a(1-e^2)\sin\varphi}{w^3} \\ \therefore M &= \frac{a(1-e^2)}{w^3} \end{aligned}$$

所以一分纬度的子午弧弧长，即：

$$\begin{aligned} 1n \text{ mile} &= M \cdot \text{arc}1' \\ &= a(1-e^2)(1-e^2\sin^2\varphi)^{-3/2} \cdot \text{arc}1' \\ &= a \left[ 1 - e^2 + \frac{3}{4}e^2(1-\cos 2\varphi) \right] \cdot \text{arc}1' \\ &= 1852.25 - 9.31\cos 2\varphi (\text{m}) \end{aligned}$$

因此，椭圆子午线上 1 分纬度弧长，即 1 海里的长度是不固定的，它是随着纬度的不同而略有差异。从表 1-1-2 中可以看出，它在赤道上最短为 1842.9m；而在两极最长达 1861.6m。约在纬度  $44^\circ 14'$  处 1 海里的长度才等于 1852m。

表 1-1-2

| $\varphi$ | $0^\circ$ | $15^\circ$ | $30^\circ$ | $45^\circ$ | $60^\circ$ | $75^\circ$ | $90^\circ$ |
|-----------|-----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\Delta$  | 1842.9    | 1844.2     | 1847.6     | 1852.3     | 1856.9     | 1860.3     | 1861.6     |

但在航海上有时为了实际应用的需要，必须用一个固定值作为 1 海里的统一长度。我国法定计量单位规定  $1n \text{ mile} = 1852\text{m}$ 。这个长度也是 1929 年国际水文地理学会议通过的海里标准长度。

将 1852m 作为一海里的固定值后，在航海实践中产生的误差并不大，可以忽略不计。例如：某船沿着赤道向正东航行，船速每小时为 25n mile，航行一天后船航进了  $25 \times 24 = 600$  n mile，但这是按一海里等于 1852m 计算的。如果根据赤道上一海里实际长度 1842.9m 计算，则船舶一天航行的距离应该是：

$$\frac{1852 \times 600}{1842.94} \approx 603n \text{ mile (当 } \varphi = 0^\circ \text{ 时)}$$

由此可以看出，在这种情况下将一海里长度固定为 1852m 后，所产生的误差只有航行距离的 0.5%。若在中纬度航行，则所产生的误差将更小。

在航海工作中，还可能会用到以下一些长度单位：

链 (cable)：一链等于十分之一海里，约为 185m。

米 (meter)：国际通用长度单位。航海上常用它作为高程和水深的单位。

在英版航海图书资料中，目前仍可能会遇到以下英国曾用过的长度单位：

英尺 (foot)：一英尺等于 0.3048m。

码 (yard)：一码等于 0.9144m。

拓 (fathom) : 一拓等于1.829m。

## 二、测者能见地平距离

凡通过观测者眼睛  $A$  (图1-1-5), 并与该点重力方向相重合的直线  $AO$ , 叫作测者铅垂线。由于地球并不是绝对均匀的物质构成的球体, 所以地球表面的铅垂线并不一定都通过地球球心。但由于地球扁率很小, 而半径很大, 所以一般可以认为地球表面的所有铅垂线都是通过地球球心的, 而且还认为相邻各点的铅垂线是相互平行的。

凡与测者铅垂线相垂直的平面, 都叫作测者的地平平面 (horizon)。其中通过地心的地平平面, 叫作测者真地平平面 (true horizon) 或天文地平平面 (celestial horizon); 通过测者眼睛  $A'$  的地平平面  $HH'$  (图1-1-5), 叫作测者地面真地平平面 (sensible horizon)。在大海上, 具有一定

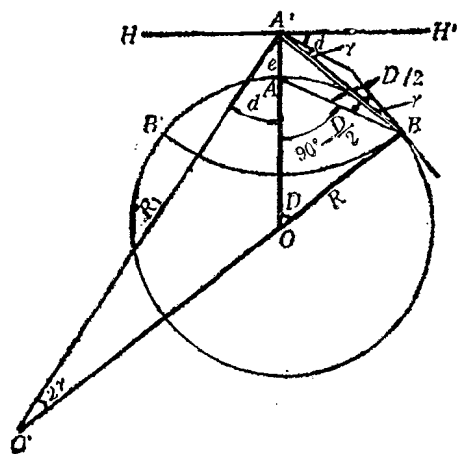


图 1-1-5

眼高  $e$  的测者, 向周围大海远眺, 所能看到的最远处, 水天似相交成一圆圈  $BB'$ , 这个圆圈所在的地平平面, 或将测者至  $BB'$  这一小块球面, 叫作测者能见地平平面或视地平平面 (visible horizon)。而圆圈  $BB'$  就是测者能见地平或视地平, 俗称水天线。

测者能见地平距离  $D_0 = \widehat{AB}$ , 它可以通过下面的推导求得。从图 1-1-5 中的  $\triangle ABA'$  可以得到:

$$\frac{A'B}{\sin\left(90^\circ + \frac{D}{2}\right)} = \frac{e}{\sin\left(\frac{D}{2} - \gamma\right)}$$

式中:  $A'B$ ——可以认为是能见地平距离  $A'B = D_0$ ;

$e$ ——观测者眼高;

$D$ ——能见地平距离  $D_0$  所对之球心角, 因此  $D_0 = RD$ ;

$\gamma$ ——地面蒙气差, 地面大气在正常情况下, 地面蒙气差系数为 0.08 或  $\gamma = \frac{D}{13}$  =

$$\frac{D_0}{13R};$$

$R$ ——地球半径。

因此可以得到:

$$D_0 = A'B = \frac{e \cos \frac{D}{2}}{\sin\left(\frac{D}{2} - \gamma\right)}$$

由于  $\frac{D}{2}$  和  $\frac{D}{2} - \gamma$  都是小角度, 所以可以认为  $\cos \frac{D}{2} \approx 1$ 、 $\sin\left(\frac{D}{2} - \gamma\right) \approx$

$\frac{D}{2} - \gamma$ 。因此:

$$D_e = \frac{e}{\frac{D}{2} - \gamma} = \frac{e}{\frac{D_e}{2R} - \frac{D_e}{13R}} = \frac{26Re}{11D_e}$$

$$\therefore D_e(\text{n mile}) = \sqrt{\frac{26 \times 3437.7468}{11 \times 1852}} \sqrt{e(\text{m})} = 2.09 \sqrt{e(\text{m})}$$

而海地平俯角  $d$  也可以从图1-1-5中的  $\triangle OA'O'$  求得。其中  $O'$  是弧  $A'B$  的圆心，因此圆心角  $\angle A'O'O$  应等于弦切角  $\gamma$  的两倍，即  $2\gamma$ 。而  $\angle OA'O'$  则是海地平俯角  $d$ ，因此：

$$d = D - 2\gamma = \frac{D_e}{R} - \frac{2D_e}{13R} = \frac{11D_e}{13R}$$

若海地平俯角  $d$  的单位用角分来表示，则：

$$d' = \frac{11D_e}{13 \times 3437.7468} \times \frac{1}{\text{arc}1'} = \frac{11}{13} D_e = 1.77 \sqrt{e(\text{m})}$$

在我国《航海表》中，根据上述能见地平距离公式编制有表III—8视距表和根据海地平俯角公式编制了表II—16海地平俯角表，它们可以用测者眼高  $e(\text{m})$  为引数，直接查出测者能见地平距离  $D_e(\text{n mile})$  和海地平俯角  $d'$ 。

### 三、物标能见距离

假如将眼睛放在物标的顶端，则此时眼睛所看到的能见地平距离，叫作物标能见地平距离。它也就等于在测者眼高为零时，在能见度良好的情况下，理论上测者能够看到物标的最大距离。因此，物标能见地平距离  $D_H$  可以与测者能见地平距离一样，按下面公式求得：

$$D_H(\text{n mile}) = 2.09 \sqrt{H(\text{m})}$$

式中： $H$ ——物标顶点离海平面的高度（m）。

物标能见地平距离  $D_H$  同样可以用物标高度代替测者眼高为引数，查航海表III—8视距表求得。

但实际上观测者总是有一定的眼高的，因此观测者理论上能够看到物标的最大距离，要比物标能见地平距离大。当能见度良好时，仅由于地面曲率和地面蒙气差的影响，测者理论上能够看到物标的最大距离，叫作物标的地理能见距离。从图1-1-6中看到，物标地理能见距离  $D_o$  可以由下面公式求得：

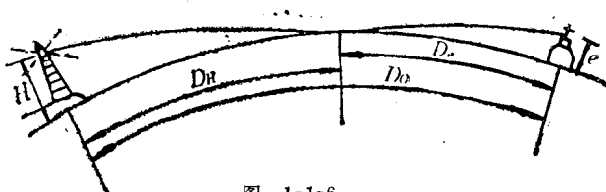


图 1-1-6

$$D_o = D_H + D_e = 2.09 \sqrt{H} + 2.09 \sqrt{e}$$

式中： $D_o$ ——物标地理能见距离(n mile)；

$H$ ——物标高度(m)；

$e$ ——测者眼高(m)。

当物标与测者之间的距离大于  $D_o$  时，测者根本不可能用眼睛看到物标。只有当两者之间的距离等于或小于  $D_o$  时，由物标反射出来的光线才不会被地面弧度即地表面阻挡，因此测者在这时候才有可能看到物标。虽有可能，但还不是一定能看到。因为测者要能看到物标，还与当时的能见度，即大气的透明度，和人们眼睛能发现物标的分辨力等有关。实践证

明,白天用双筒望远镜瞭望物标,即使是在能见度良好的情况下,眼睛正常的测者发现山头的最远距离,也只有物标地理能见距离的90%左右。因为在山顶刚露出水天线时,是很难一下子被发现的,只有在它露出海平面有一定高度时,测者才能从波涛之中将它辨认出来。

但在夜间测者观看灯塔灯光时,则情况就有所不同。如果灯塔的灯光强度能够照射的距离大于物标地理能见距离  $D_0$  时,则测者常常在离灯塔的距离稍大于  $D_0$  时,即灯塔灯芯还没有露出海平面时,就已经能够看到它的光辉,照耀得灯塔所在的海平面附近的天空,像闪电一样地发亮,但这时测者还不能直接看到灯塔的灯芯。只有在灯塔灯芯初露测者水天线那一瞬间,才是测者最初能够直接看到灯塔灯光的时刻,这时叫作灯光初显。灯塔灯光初显时,测者与灯塔之间的距离,就是灯塔的地理能见距离  $D_0$ 。同理,当船舶航离灯塔时,在灯塔灯芯初没于水天线的那一瞬间,叫作灯光初隐。同样,灯塔初隐距离也等于灯塔地理能见距离  $D_0$ 。

当然,不是所有的灯塔灯光都有初显、初隐现象的。如果灯塔光力较弱或在能见度不佳时,则往往在测者第一次发现灯塔灯光时,灯塔灯芯早已不在水天线上,而是早已高出海平面有一定的高度了,这时决不能再把它当作灯光的初显。这时灯光的初见距离也就不等于灯塔的地理能见距离  $D_0$ ,而是小于它。

晴天黑夜灯光所能照射的最大距离,叫作光力能见距离。它可以按下面公式计算求得:

$$I = \frac{ED^2}{T^2}$$

式中:  $D$ ——光力能见距离(n mile);

$E$ ——光照度,通常为 $0.67\text{cd/n mile}^2$ ,而国际灯塔会议通过采用极限照度为 $2 \times 10^{-7} I$ ;

$I$ ——灯光强度 cd;

$T$ ——大气透明度系数,晴天黑夜通常为0.85,在计算灯光射程时通常用0.74;

例如:光力为1000cd的灯塔,晴天黑夜其光力能见距离约为13.2n mile;而100cd的光力能见距离约为7n mile。

中版海图和航标表中提供的灯塔射程的定义是:晴天黑夜,当测者眼高为5 m时,能够看到灯塔灯光的最大距离。因此,如果灯塔光力较强,即光力能见距离大于或等于测者眼高5 m时的灯塔地理能见距离,则这种灯塔的射程按定义是等于测者眼高5 m时的灯塔地理能见距离。如果灯塔光力较弱,即光力能见距离小于测者眼高5 m时的灯塔地理能见距离,则其射程是等于该灯塔的光力能见距离。显然,只有前者才有可能有灯光的初显和初隐;而后者则不可能有初显或初隐。同理,只有前者有可能在测者眼高大于5 m时,在大于射程的距离上,或在灯光初显时就看到它;而后者则只有船舶航行到射程范围之内,才有可能看到它。灯光初显距离与射程的关系是:

$$\text{初显距离} = \text{射程} + (2.09\sqrt{e} - 2.09\sqrt{5})$$

显然,上述强光灯测者有可能在灯光初显时就看到它,因此强光灯的最大可见距离等于物标的地理能见距离;而弱光灯的最大可见距离就只能等于它的射程,即光力能够照到的距离范围。

英版海图和灯标表中提供的灯塔射程的定义是:光力射程(luminous range),指在某一气象能见度条件下,灯光光力的最大能见距离;或指定光力射程(nominal range),指在气象能见度为10n mile条件下,灯光光力的最大能见距离。它们只与灯光强度和气象

能见度有关,而与眼高、标高、地面曲率和地面蒙气差等均无关。

因此,英版资料中的灯塔灯光的最大可见距离是这样来确定的:当射程大于该灯塔的地理能见距离  $D_0$  时,灯光最大可见距离等于  $D_0$ ;当射程小于  $D_0$  时,灯光最大可见距离等于射程。

实际上,测者能够看到灯塔灯光的实际距离还与很多因素有关,如与光力强度、气象能见度、地面蒙气差、灯高、眼高、眼睛能够发现最弱灯光的能力、以及灯标和测者附近背景的亮度等因素都有关系。所以上述计算并不一定能完全符合实际情况。因此,灯塔灯光最大可见距离的计算,只能在制定航行计划时,作为预计灯塔何时有可能被看到的参考数据。

### 第三节 航向与方位

#### 一、方向的确定和划分

在地面上怎样来确定测者周围的方向呢?方向只能在测者地平平面上来确定。从图1-1-7中可以看到,观测者  $A$  点的子午圈平面  $P_N A P_S O$  与测者地面真地平平面  $A' N E S W$  相交的直线  $N A' S$ ,是测者方向的基准线——南北线。它近北极  $P_N$  的一方是测者的正北方向;近南极  $P_S$  的一方是测者的正南方向。对于不同地点的测者来说,它们各有其不同的铅垂线方向、不同的地面真地平平面和不同的南北方向基线。

通过测者铅垂线  $A' A O$ ,并与测者子午圈平面相互垂直的平面,叫作测者的卯酉圈平面。卯酉圈平面与测者地面真地平平面相交的直线  $E A' W$ ,叫作测者的东西线。当测者面北背南时,测者东西线的右方是正东方向,左方是正西方向。

仅在测者地平面上确定北东南西四个基点的方向是不够的。它还不能完全表示出测者地平面上的其它各个方向。航海上进一步划分方向的方法,常用的有以下三种:

1.圆周法:以正北为 $000^\circ$ ,按顺时针方向计算至正东为 $090^\circ$ ,正南为 $180^\circ$ 和正西为 $270^\circ$ ,再计算至正北为 $360^\circ$ 。圆周法始终用三位数字来表示方向,它是航海上最常用的表示方向的方法。

2.半圆法:以正北或正南为 $0^\circ$ ,向东或向西,由 $0^\circ$ 到 $180^\circ$ 计算到正南或正北。其方向的表示方法是:除度数外,还必须标明起算点和计算方向。如 $24^\circ \text{NE}$ 、 $135^\circ \text{NW}$ 、 $145^\circ \text{SE}$ 或 $175^\circ \text{SW}$ 等。度数后缀的方向,前者表示该方向是由北点( $N$ ),还是以南点( $S$ )起算的;而后者则表示该方向是向东( $E$ ),还是向西( $W$ )来计算的。在航海天文学中,常用半圆法来表示天体的方位。

3.罗经点法:将等分北东南西四个方向基点之间地平平面上的方向,叫作隅点,即北东( $\text{NE}$ )、南东( $\text{SE}$ )、南西( $\text{SW}$ )和北西( $\text{NW}$ )四个方向,或我国习惯上将它们叫作东北、东南、西南和西北四个方向。又把等分基点和隅点之间地平平面上的方向,叫作三

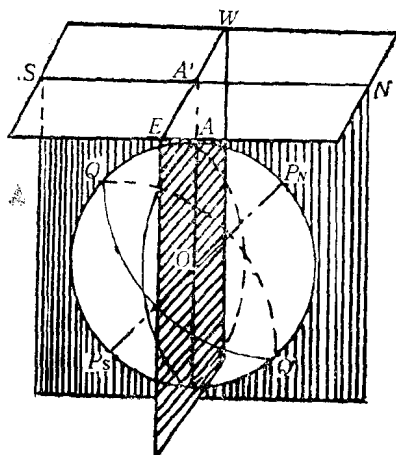


图 1-1-7

字点。其名称是用基点名称之后加上隅点名称来组成，即北北东（NNE）、东北东（ENE）、东南东（ESE）、南南东（SSE）、南南西（SSW）、西南西（WSW）、西北西（WNW）和北北西（NNW）等八个三字点。再把等分基点或隅点与三字点之间的地平平面上的方向，叫作偏点。其名称是在基点或隅点名称之后加上偏向的方向来组成，如北偏东（N/E）、北东偏北（NE/N）、南西偏西（SW/W）……等十六个偏点（图1-1-8）。

这样，四个基点、四个隅点、八个三字点和十六个偏点共计32个方向点，叫作32个罗经点。但罗经点也可以被认为是两个相邻的罗经点方向之间的角度。因此：

$$1 \text{ 点} = 11\frac{1}{4}^{\circ} \text{、或 } 4 \text{ 点} = 45^{\circ}$$

罗经点在过去曾经被广泛地运用在航海上，但目前仅用它来表示风流等的大概方向。

三种方向划分系统之间的换算方法，如下所述：

1. 半圆法换算成圆周法的法则是：

- 在北东（NE）半圆      圆周度数等于半圆度数
- 在南东（SE）半圆      圆周度数等于180°减半圆度数
- 在南西（SW）半圆      圆周度数等于180°加半圆度数
- 在北西（NW）半圆      圆周度数等于360°减半圆度数

例：半圆法方向      圆周法方向

- 135°NE      135°
- 45°SE      180° - 45° = 135°
- 100°SW      180° + 100° = 280°
- 100°NW      360° - 100° = 260°

2. 罗经点法换算成圆周法的法则是：1 点

$$= 11\frac{1}{4}^{\circ}$$

例：将方向点 SW 换算成圆周法度数。

解：方向点 SW 在罗经点法中是第 20 个点，因此将它换算成圆周法时，则：

$$SW = 11\frac{1}{4}^{\circ} \times 20 = 225^{\circ}$$

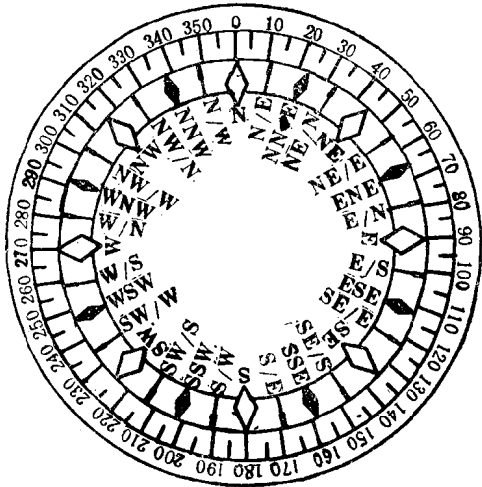


图 1-1-8

## 二、航向、方位和舷角

航海上经常遇到的两种方向是：船首方向和物标方向。现将它们的定义解释如下（图 1-1-9）：

**航向线（course line）**：当船平正时，通过船舶铅垂线的纵剖面，是船舶的首尾面。它与船舶真地平平面相交的直线，叫作船首尾线（fore and aft line）。船首尾线向船首方向的延长线，叫作航向线。

**真航向（true course）**：船舶航行时，在船上测者的真地平平面上，从正北方向线到航向线之间的夹角，叫作船舶的真航向，代号 *TC*。它在地面上是测者真子午圈平面到船首尾面之间的两面角。

船首向 (heading)：指在任何情况下，船舶某一瞬间的船首方向。它常用于船舶在港内操纵或锚泊时，代号为  $Hdg$ 。

方位线 (bearing line)：在地球面上连接测者与物标的大圆  $AM$  (图1-1-9)，叫作物标的方位圈。而方位圈平面与测者地面真地平平面相交的直线  $A'M'$ ，叫作物标的方位线。

真方位 (true bearing)：在测者地面真地平平面上，从正北方向线到物标方位线之间的夹角，叫作物标的真方位，代号  $TB$ 。它在地面上是测者真子午圈平面到物标方位圈平面的两面角。

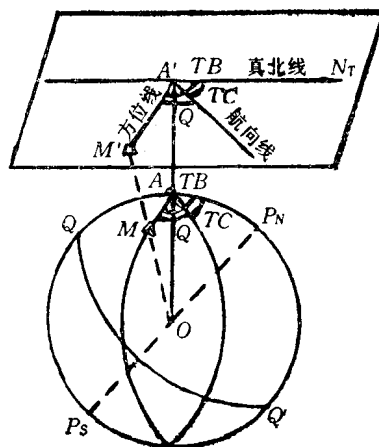


图 1-1-9

舷角 (relative bearing)：在测者地面真地平平面上，以航向线为基准，从航向线到方位线之间的夹角，叫作物标的舷角或相对方位，代号  $Q$ 。它是以船首方向为  $0^\circ$ ，按顺时针方向由  $0^\circ$  到  $360^\circ$  计量，计算到物标方位线；或以船首方向为  $0^\circ$ ，向右或向左由  $0^\circ$  到  $180^\circ$  计量，计算到物标方位线，它们分别叫作物标的右舷角  $Q_{右}$  或左舷角  $Q_{左}$ 。在地面上，舷角是船首尾面与地面相交的大圆，与物标方位圈之间的球面角。

当舷角  $Q = 90^\circ$  或  $Q_{右} = 90^\circ$  时，叫作物标的右正横；而当  $Q = 270^\circ$  或  $Q_{左} = 90^\circ$  时，则叫作物标的左正横。

物标的真方位是以测者正北方向线为基准度量的，因此它与航向变化无关。也就是说如果测者位置不变，虽然航向改变了，但物标真方位是不变的。但物标舷角是以船首尾线为基准度量的，因此航向改变后，舷角也就随着改变。航向、方位与舷角之间的关系是：

$$\text{真方位 } TB = \text{真航向 } TC + \text{舷角 } Q$$

或

$$\text{真方位 } TB = \text{真航向 } TC + \text{舷角 } Q \begin{cases} Q_{右} \text{ 为 } (+) \\ Q_{左} \text{ 为 } (-) \end{cases}$$

例1：某船真航向  $235^\circ$ ，测得两物标舷角分别为  $Q_A 36^\circ$  和  $Q_B 315^\circ$ ，求物标的真方位。

解：

$$TB_A = TC + Q_A = 235^\circ + 36^\circ = 271^\circ$$

$$TB_B = TC + Q_B = 235^\circ + 315^\circ = 550^\circ \text{ 即 } 190^\circ$$

例2：某船真航向  $070^\circ$ ，求物标左正横时的真方位。

解：

$$TB = TC + Q = 070^\circ + (-90^\circ) = -20^\circ \text{ 即 } 340^\circ$$

### 三、航海上方向的测定

航海上测定航向和方位的仪器是罗经 (compass)。目前海船上配备的罗经有磁罗经 (magnetic compass) 和陀螺罗经 (gyro compass) (俗称电罗经) 这两大类型。

#### 1. 陀螺罗经

陀螺罗经是根据高速旋转的陀螺仪，在受到适当的阻尼作用后，能迫使其旋转轴保持在真子午圈平面内的原理而制成的。因此，陀螺罗经是一种有较大指北力的电动机械仪器。它不受地磁场和电磁场的影响。陀螺罗经的指北力要比磁罗经的指北力大很多倍，所以它能带动若干个分罗经，分别安装在驾驶台和驾驶台两翼、标准罗经甲板上、海图室内、以及船长